



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

①2 **Offenlegungsschrift**
①0 **DE 196 21 112 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
G 02 B 6/13
G 02 B 6/124

②1 Aktenzeichen: 196 21 112.3
②2 Anmeldetag: 24. 5. 96
④3 Offenlegungstag: 27. 11. 97

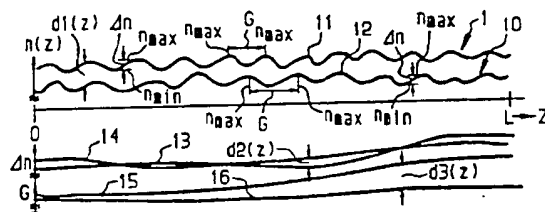
DE 196 21 112 A 1

⑦1 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:
Noé, Reinhold, Prof. Dr., 33100 Paderborn, DE;
Sandel, David, Dipl.-Ing., 33102 Paderborn, DE

⑤4 Verfahren zur Herstellung eines optischen Gitters

⑤7 Zur Herstellung optischer Gitter (1) mit hoher Genauigkeit wird zunächst ein optisches Gitter (10) mit noch nicht der gewünschten Genauigkeit erzeugt, an dem erzeugten Gitter (10) ein komplexes Reflexionsspektrum (cSp) gemessen, aus diesem Spektrum durch inverse Fourier-Transformation eine Impulsantwort (Ir) des erzeugten Gitters (10) berechnet, aus dieser Impulsantwort durch Lösung eines eindimensionalen Rückstreuproblems der Brechzahlverlauf des erzeugten Gitters berechnet, wonach mit brechzahlverändernden Mitteln eine Differenz zwischen dem Brechzahlverlauf (12) des erzeugten Gitters (10) und einem gewünschten Sollbrechzahlverlauf (11) ausgeglichen wird.



DE 196 21 112 A 1

Die Erfindung betrifft die Herstellung eines optischen Gitters in einem optischen Leiter nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Durch Belichtung eines optischen Leiters aus beispielsweise Quarzglas mit ultraviolettem Licht erhöht sich die effektive Brechzahl des Leiters. Durch Anwendung einer periodisch sich ändernden Belichtungsintensität kann im Leiter ein optisches Gitter mit periodisch sich ändernder Brechzahl erzeugt werden. Beispiele solcher Gitter sind Bragg-Gitter, insbesondere Bragg-Gitter, die in optischen Leitern in Form von optischen Wellenleitern ausgebildet sind (siehe z. B. K.O. Hill "Photosensitivity and its application to optical fiber communication", Proc. Conf. on Optical Fiber Communications (OFC '95), WA, Volumen Tutorial Sessions, S. 145—193). Vorteile dieser in optischen Wellenleitern, insbesondere optischen Fasern ausgebildeten Bragg-Gitter sind die sehr geringe Dämpfung der Wellenleiter, ihr niedriger Preis und die Möglichkeit, entlang einer Längsachse der Wellenleiter relativ lange Gitter von beispielsweise 10 bis 120 mm Länge herzustellen.

Die Empfindlichkeit des optischen Leiters gegenüber ultravioletter Belichtung läßt sich durch geeignete Vorbehandlung erhöhen. Beispielsweise kann dazu der Leiter unter Druck und Temperaturerhöhung einer Wasserstoffatmosphäre ausgesetzt werden.

Allgemein werden durch optische Strahlung erzeugte optische Gitter als photosensitive Gitter bezeichnet.

Eine wichtige Anwendung langer optischer Gitter ist die Dispersionskompensation von optischen Wellenleiterübertragungsstrecken mit dispersionsbehaftetem optischem Wellenleiter. In diesem Fall muß sich die Gitterkonstante des optischen Gitters als Funktion des Ortes auf der Längsachse des Wellenleiters ändern, längs der sich die im Wellenleiter geführte optische Strahlung ausbreitet. Üblicherweise sollen in der Ausbreitungsrichtung der Strahlung am Anfang des Gitters hohe, in der Mitte mittlere und am Ende niedrige Wellenlängen reflektiert werden. Die Gruppenlaufzeit von optischen Signalen ist deshalb für hohe Wellenlängen niedrig und für niedrige hoch, was die Dispersion von optischen Standardwellenleitern in Form von Fasern im Bereich um 1550 nm ausgleicht.

In der Regel wird der optische Leiter zur Gitterherstellung nicht direkt belichtet, sondern durch eine Maske. Die Maske und/oder das Gitter selbst werden durch Beschriftung mit einem Elektronenstrahlschreiber hergestellt oder durch Belichtung mit zwei gekreuzten monochromatischen ultravioletten optischen Strahlen, welche ein Interferenzmuster erzeugen.

Die Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeiten der vorstehend genannten Gitter zum Dispersionsausgleich, aber auch vieler anderer Gitter, sind extrem hoch. Besonders bei Beschriftung der Maske mittels Elektronenstrahl, in geringerem Maße aber auch bei der Erzeugung des Interferenzmusters mit gekreuzten Lichtstrahlen, kommt es zu relativ großen Herstellungsfehlern, welche die Qualität eines Gitters so vermindern, daß es nicht oder nicht mit dem gewünschten Erfolg für den gedachten Zweck, beispielsweise zum Dispersionsausgleich, eingesetzt werden kann. Eine verwendete Maske relativ guter Qualität ist aus R.I. Laming et al, "Dispersion compensation with chirped fiber Bragg grating to 400 km at 10 Gbit/s in nondispersion-shifted fiber", Proc. Conf. on Optical Fiber Communication (OFC'96), ThA5, San José, 1996, bekannt, aber der Di-

spersionsausgleich wäre bei einer Datenrate von 20 Gb/s oder mehr selbst mit einer Maske dieser Qualität kaum möglich.

Typisch für die Herstellung von Masken mittels Elektronenstrahlschreiber ist es, daß bestimmte Schreibfenster zur Verfügung stehen. Die gewünschten Gitter- und auch Maskendimensionen sind aber viel, viel größer als die Länge eines Schreibfensters. Nach Beschreiben eines Fensters muß das Objekt oder die Einrichtung zur Erzeugung des Elektronenstrahls weiterbewegt werden. Mittels Justiermarken läßt sich das nächste Fenster bündig an das vorherige anschließen. Dabei treten jedoch Justierfehler auf, die auch als "Stitch Errors" bezeichnet werden. Die Justierfehler können z. B. in der Größenordnung von 40 Nanometern liegen, während ein Schreibfenster eine Längendimension von 400 Mikrometern besitzen kann. Damit treten Justierfehler in einer Größenordnung auf, die allenfalls in Ausnahmefällen toleriert werden können.

Ein Lösung des vorstehenden Problems besteht in der Verwendung einer höheren Qualität der Werkzeuge bei der Gitterherstellung. Beispielsweise wird versucht, Phasenmasken oder Gitter mit möglichst hoher Qualität dadurch herzustellen, daß die Bedingungen und Strahlqualitäten zweier interferierender ultravioletter Lichtstrahlen besonders gut kontrolliert werden. Alternativ dazu könnten qualitativ besonders hochwertige Elektronenstrahlschreiber eingesetzt werden, aber in solcher Qualität gibt es Elektronenstrahlschreiber derzeit vermutlich nicht.

Es kann auch auf den Brechzahlverlauf Einfluß genommen werden. Die Brechzahl erhöht sich — zumindest in der Regel — monoton mit der Stärke, d. h. der Intensität und Dauer, der Belichtung. Ein technologisches Problem ist dabei nebenbei bemerkt, daß die Brechzahl nachträglich wieder in gewissem Umfang absinken kann. Dieses Problem kann durch verbesserte Herstellprozesse und/oder Vorhalten, d. h. überhöhte Belichtung, in den Griff gebracht werden.

Als Wechselbelichtung sei hier Belichtung mit Licht mit einer sich als Funktion des gewünschten periodischen Brechzahlverlaufs periodisch ändernden Intensität bezeichnet. Sie ergibt sich bei Verwendung einer entsprechenden Belichtungsmaske oder gekreuzter interferierender Lichtstrahlen.

Wechselbelichtung der Gitterstruktur hebt die Brechzahlmaxima. Damit verstärkt sich einerseits die Brechzahlmodulationstiefe des Gitters, die gleich der Differenz zwischen einem Brechzahlmaximum und Brechzahlminimum ist, wobei das Brechzahlminimum die ursprüngliche Brechzahl des unbelichteten optischen Leiters ist, andererseits auch die mittlere Brechzahl; letztere um einen Betrag, der etwa halb so groß wie die Brechzahldifferenz ist. Die Brechzahldifferenz bestimmt die Stärke des Gitters, d. h. den lokalen Koppelkoeffizienten zwischen entlang der Längsachse vorwärts- und rückwärts durch das Gitter laufenden optischen Wellen. Die Brechzahlmaxima definieren die Gitterrippen. Die ebenfalls ortsabhängige mittlere Brechzahl wirkt sich auf die optische Weglänge zwischen benachbarten Gitterrippen aus, d. h. sie bestimmt die lokale Gitterkonstante.

Bei hohen Wechselbelichtungsstärken kann folgender Effekt eintreten: Die maximale Brechzahl kann nicht weiter ansteigen, weil die entsprechende chemische Reaktion an den entsprechenden Orten bereits gesättigt ist. Durch Streulicht, das eine vergleichsweise geringe Ausprägung der im folgenden definierten Gleichbelich-

tung ist, kann es aber zu einer allmählichen Auffüllung der Brechzahlminima kommen. Durch solch hohe Wechselbelichtungsstärken und das damit einhergehende Streulicht kann es also auch zu einer Senkung der Brechzahldifferenz kommen.

Gleichbelichtung sei hier die Belichtung mit Licht, dessen Stärke sich nicht periodisch ändert. Gleichbelichtung ergibt sich durch Belichtung mit einem Lichtstrahl statt zweier gekreuzter Lichtstrahlen oder durch Weglassen der Maske.

Die Gleichbelichtung hebt die mittlere Brechzahl des optischen Leiters an. Wegen der Sättigung der möglichen Brechzahlhebung bei sehr starker Belichtung kann es dabei zu einer Reduktion der Brechzahlmodulationstiefe kommen, und zwar in noch stärkerem Maße, als es für den Fall hoher Wechselbelichtungsstärken gerade beschrieben wurde.

Eine qualitative Erklärung der Effekte, die durch die beiden vorstehend genannten Arten der Gitterbelichtung, der Wechselbelichtung und Gleichbelichtung, bei der Gittereigenschaften entstehen, ist T.A. Strasser et al "UV-induced Fiber Grating OADM Devices for Efficient Bandwidth Utilization", OFC'96, PDB, San Jos'd, 1996 zu entnehmen.

Der im Anspruch 1 angegebenen Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Herstellung eines optischen Gitters der eingangs genannten Art bereitzustellen, mit welchem optische Gitter der eingangs näher bezeichneten Art mit hoher Genauigkeit herstellbar sind.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können vorteilhafterweise optische Gitter der näher bezeichneten Art hergestellt werden, die extrem hohen Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeit, insbesondere denen zum Dispersionsausgleich genügen, so daß Dispersionskompensatoren mit optischen Gittern, insbesondere auf oder in optischen Wellenleitern hergestellt werden können.

Bevorzugte und vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens gehen aus den Ansprüchen 2 bis 19 hervor.

Als optische Wellenleiter können bei der Erfindung neben den bekannten kreiszylindrischen optischen Fasern andere Wellenleiter, beispielsweise auf Substraten aus beispielsweise Glas flächig oder streifenförmig integrierte Schichtwellenleiter verwendet werden. Prinzipiell läßt sich die Erfindung bei der Ausbreitung ebener homogener optischer Wellen in einem Dielektrikum mit Gitterstruktur verwenden. Dabei handelt es sich einfach um einen vielmodigen optischen Wellenleiter, der aber nur mit einem Modus angeregt wird. Bevorzugt sind einmodige optische Wellenleiter.

Die Erfindung ist insbesondere für den Fall der Verwendung einer Maske geeignet, läßt sich aber auch in Fällen direkter Belichtung einsetzen. Sie nutzt die Möglichkeit der nachträglichen Beeinflussung der Gittereigenschaften bei der Herstellung durch die oben erwähnten bekannten Arten der Gitterbelichtung aus.

Es wäre denkbar, eine solche nachträgliche Beeinflussung aufgrund skalar gemessener Reflexions- oder Transmissionsspektren vorzunehmen. Skalare Messung der Spektren ermöglicht jedoch keinesfalls eine exakte, sondern äußerstenfalls eine sehr grobe Korrektur der Eigenschaften des hergestellten Gitters, die den hohen Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeit nicht genügt.

Die Erfindung nutzt wesentlich die nachträgliche Beeinflussung der Gittereigenschaften aufgrund komplex

gemessener Reflexions- und/oder Transmissionsspektren aus.

Das komplexe Reflexionsspektrum eines Gitters zu messen, ist nach S. Barcelos et al "Dispersion measurements for chirped fiber gratings", ECOC '95, Mo.A3.4, S. 35-38, möglich. Aus dem gemessenen Spektrum kann durch inverse Fouriertransformation die entsprechende Impulsantwort des Gitters im Reflexions- und/oder Transmissionsbetrieb berechnet werden.

Die Erfindung wird in der nachfolgenden Beschreibung an Hand der Figuren beispielhaft näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 einen Längsschnitt durch einen beispielhaften optischen Wellenleiter in Form einer Kern-Mantel-Glasfaser entlang der Längsachse dieser Faser, wobei verschiedene Möglichkeiten zur insbesondere nachträglichen Beeinflussung eines im Kern ausgebildeten optischen Gitters angedeutet sind,

Fig. 2 ein Diagramm, welches beispielhaft einen jeweils periodisch schwankenden Soll- und Istverlauf der Brechzahl des Kerns der Faser nach Fig. 1 entlang deren Längsachse und je einen Soll- und Istverlauf einer Gitterstärke und Gitterkonstanten entlang dieser Längsachse darstellt,

Fig. 3 ein Diagramm, welches beispielhaft ein mit einem durch die Faser nach Fig. 1 geschickten optischen Signal gemessenen komplexes optisches Reflexionsspektrum über der optischen Frequenzachse darstellt,

Fig. 4 und 5 eine erste und zweite beispielhafte Vorrichtung zur Messung des komplexen Reflexionsspektrums,

Fig. 6 ein Diagramm, welches beispielhaft eine aus dem gemessenen komplexen Spektrum berechnete Impulsantwort im Vergleich zu einer Sollimpulsantwort über der Zeitachse darstellt,

Fig. 7 ein Diagramm, welches beispielhaft und einander überlagert jeweils eine Differenz zwischen dem Soll- und Istverlauf der Brechzahl, der Gitterstärke und der Gitterkonstanten im Kern der Faser nach Fig. 1 entlang deren Längsachse darstellt.

Die Figuren sind schematisch, rein qualitativ und nicht maßstäblich.

Nach Fig. 1 besteht der beispielhafte optische Leiter 2 aus einer Kern-Mantel-Glasfaser mit einem sich entlang der Längsachse 21 dieser Faser 2 erstreckenden Kern 20 und einem den Umfang 200 des Kerns 20 umgebenden optischen Mantel 22. Kern 20 und Mantel 22 sind im Querschnitt senkrecht zur Längsachse 21 kreisförmig. Der Kern 20 weist im Vergleich zum Mantel 22 eine größere Brechzahl n auf.

Im Kern 20 ist ein optisches Gitter 1 oder 10 ausgebildet, das sich entlang der Längsachse 21 der Faser 2 eine bestimmte Länge L , beispielsweise von einem Ende 2₁ zum entgegengesetzten Ende 2₂ der Faser 2, erstreckt und auf dieser Länge L durch einen in Fig. 2 gezeigten, entlang der Längsachse 21 der Faser 2 periodisch schwankenden Verlauf 11 bzw. 12 der Brechzahl n des Kerns 20 der Faser 2 definiert ist. Die Längsachse 21 der Faser 2 ist zugleich die Längsachse des Gitters 1 bzw. 10.

Die Gitterstärke Δn dieses Gitters 1 oder 10 ist durch die Differenz zwischen einem Brechzahlmaximum n_{\max} und einem diesem Maximum benachbarten Brechzahlminimum n_{\min} periodisch schwankenden Verlaufs 11 bzw. 12 der Brechzahl n des Kerns 20 gegeben. Die Gitterkonstante des Gitters 1 oder 10 ist durch den Abstand G zwischen zwei benachbarten Brechzahlmaxima n_{\max} gegeben.

Ebenso wie die Brechzahl $n(z)$ des Kerns 20 ist oft-

mals die Gitterstärke Δn und auch die Gitterkonstante G eine nichtkonstante Funktion $\Delta n(z)$ bzw. $G(z)$ des Ortes z auf der Längsachse 21 des Gitters 1 bzw. 10, so daß dann der Verlauf 13 bzw. 14 der Gitterstärke Δn und der Verlauf 15 bzw. 16 der Gitterkonstanten G entlang der Längsachse 21 variiert, wenngleich in der Regel langsam und nicht periodisch.

Das Gitter 1 oder 10 kann durch Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels, beispielsweise UV-Strahlung, auf das Material insbesondere des Kerns 20, aber auch der in der Nähe des Kerns 20 liegenden Teile des Mantels 22 der Faser 2 erzeugt werden.

Um beispielsweise im Kern 20 ein Gitter 1 mit einem periodisch schwankenden Sollverlauf 11 der Brechzahl n und/oder einem Sollverlauf 13 der Gitterstärke Δn und/oder einem Sollverlauf 15 der Gitterkonstanten G zu erzeugen, wird erfindungsgemäß so vorgegangen, daß zunächst in der Faser 2 durch Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels auf das Material der Faser 2 ein optisches Gitter 10 erzeugt wird, das entlang der Längsachse 21 einen gewissen, periodisch schwankenden Istverlauf 12 der Brechzahl n des Kerns 20 aufweist, dem ein gewisser Istverlauf 14 der Gitterstärke Δn und ein gewisser Istverlauf 16 der Gitterkonstanten G entspricht. Gewisser Istverlauf bedeutet, daß der Istverlauf sicher vorhanden, aber noch nicht genau bestimmt ist.

In den dieses erzeugte Gitter 10 enthaltenden Kern 20 wird dann ein optisches Signal oS , beispielsweise über das eine Ende 2, der Faser 2, eingekoppelt (siehe Fig. 1), welches das Gitter 10 entlang der Längsachse 21 durchläuft. Dieses Signal oS ist vorzugsweise ein unmoduliertes Signal, vorzugsweise mit variabler optischer Frequenz.

Mit diesem Signal oS wird erfindungsgemäß ein bestimmtes komplexes optisches Spektrum cSp des erzeugten Gitters 10 gemessen, vorzugsweise ein komplexes Reflexionsspektrum.

Die Fig. 3 zeigt qualitativ die Komponenten eines solchen komplexen Reflexionsspektrums cSp in Abhängigkeit von der optischen Frequenz oF . Diese jeweils von der optischen Frequenz oF abhängigen Komponenten sind der Realteil Re und der Imaginärteil Im . Der Übersichtlichkeit halber ist auch der Betrag $\sqrt{(Re)^2 + (Im)^2}$ eingezeichnet.

Zur Messung des komplexen Reflexionsspektrums cSp gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zwei davon seien an Hand der Fig. 4 und 5 beispielhaft näher erläutert.

Das Beispiel nach Fig. 4 basiert auf einer in R.G. Priest "Analysis of fiber interferometer utilizing 3x3 fiber coupler", IEEE J. Quantum Electronics, QE-18, No. 10, Oct. 1982, S. 1601—1603, angegebenen Methode, bei der ein optisches Mach-Zehnder-Interferometer mit einem optischen 3x3-Koppler verwendet wird, in dessen einem Arm sich das das Meßobjekt befindet.

Im Unterschied zu dem in der Fig. 1 dieses Dokuments dargestellten Interferometer, bei dem einer der beiden Arme eine Signalspule und der andere eine Referenzspule enthalten, ist bei dem Interferometer 40 nach Fig. 4 zur Messung des komplexen optischen Reflexionsspektrums cSp des Gitters 10 die Referenzspule durch ein kurzes Stück Lichtwellenleiter 41 ersetzt.

Die Signalspule ist durch einen 3-Tor-Zirkulator 42 mit den in der Zirkulationsrichtung 420 aufeinanderfolgenden Toren 42₁, 42₂ und 42₃ ersetzt, wobei das erste Tor 42₁ an die Lichtquelle 40₁ und das dritte Tor 42₃ an den 3x3-Koppler 40₂ angeschlossen ist. An das mittlere

Tor 42₂ ist das zu untersuchende Gitter 10 angeschlossen. Es werden das zur Messung verwendete optische Signal oS aus dem mittleren Tor 42₂ in das Gitter 10 eingekoppelt und im Gitter 10 rückreflektierte bzw. gestreute Anteile des eingekoppelten optischen Signals oS über das mittlere Tor 42₂ und das dritte Tor 42₃ dem 3x3-Koppler 40₂ zugeleitet.

Die an den drei Ausgängen des 3x3-Kopplers 40₂ zu messenden optischen Leistungen P_1 , P_2 , P_3 verändern sich als Funktion der Phasenverzögerung zwischen den beiden Interferometerarmen sinusförmig, mit unterlagertem Gleichsignal. Durch die Hybrideigenschaft des 3x3-Kopplers 40₂ läßt sich die Phasenverzögerung mit hoher Genauigkeit bestimmen, denn es tritt bei sich ändernder Phasenverzögerung nie mehr als ein Extremum der Lichtleistungen P_1 , P_2 , P_3 gleichzeitig auf.

Zur Messung des komplexen Reflexionsspektrums cSp ist die optische Frequenz oF des von der Lichtquelle 40₁ erzeugten optischen Signals oS über einen interessierenden Frequenzbereich zu variieren, wobei die Leistungen P_1 , P_2 , P_3 als Funktion der optischen Frequenz oF aufgenommen werden.

Durch Vereinfachung des Ausführungsbeispiels nach Fig. 4 derart, daß der mittlere Arm 43 des Kopplers 40₂ und die Messung einer optischen Leistung P_2 entfallen, gelangt man zu einem einfacheren Aufbau, wie er beispielsweise in Fig. 5 dargestellt ist.

Beim Beispiel nach Fig. 5 ist an Stelle des Mach-Zehnder-Interferometers ein Michelson-Interferometer 50 mit zwei durch einen optischen Koppler 50₂ aneinandergekoppelten Armen 51 und 52 verwendet.

An einen Arm 51 ist auf der von der Lichtquelle 50₁ abgekehrten Seite das reflektierende Gitter 10 eingekoppelt, der andere Arm 52 ist auf dieser Seite durch einen optischen Reflektor 50₃ abgeschlossen.

Im Unterschied zu einem herkömmlichen Michelson-Interferometer, bei dem der Koppler 50₂ ein 2x2-Koppler ist, besteht beim Interferometer 50 dieser Koppler 50₂ vorteilhafterweise aus einem 3x3-Koppler. Optische Leistungen P_1 und P_2 werden an zwei auf der Seite der Lichtquelle 50₁ liegenden Ausgängen des 3x3-Kopplers 50₂ entnommen.

Dadurch werden die Vorteile des einfachen Aufbaus eines Michelson-Interferometers mit dem Vorteil eines 3x3-Kopplers, Phasenverzögerungen sehr genau messen zu können, kombiniert.

Bei den Ausführungsbeispielen nach den Fig. 4 und 5 kann bei Bedarf auf die Messung aller Leistungen, mit Ausnahme einer der Leistungen P_1 und P_2 und im Fall von Fig. 5 auch P_3 verzichtet werden.

Aus dem zumindest näherungsweise gemessenen komplexen Reflexionsspektrum cSp des erzeugten Gitters 10 wird mittels einer Fouriertransformation eine komplexe Impulsantwort Ir mit dem Realteil $Re(Ir)$ und Imaginärteil $Im(Ir)$ des erzeugten Gitters 10 zumindest näherungsweise berechnet. Diese Fouriertransformation sei als inverse Fouriertransformation bezeichnet, da üblicherweise aus einer gemessenen Impulsantwort durch Fouriertransformation das Spektrum berechnet wird und nicht wie bei der vorliegenden Erfindung umgekehrt.

In der Fig. 6 ist qualitativ ein Beispiel einer berechneten komplexen Impulsantwort Ir zu einer Sollimpulsantwort Ir_0 mit dem Realteil $Re(Ir_0)$ und Imaginärteil $Im(Ir_0)$ auf der Zeitachse t dargestellt.

Aus der berechneten Impulsantwort Ir wird durch eine Lösung eines bestimmten eindimensionalen Streuproblems der gewisse Istverlauf 12, 14 bzw. 16 der

Brechzahl n und/oder der Gitterstärke Δn und/oder der Gitterkonstanten G des erzeugten Gitters 10 entlang der Längsachse 21 zumindest näherungsweise berechnet.

Im Gitter 10 entsteht die Impulsantwort durch einen eindimensionalen Streuvorgang aus dem Brechzahlverlauf entlang der Längsachse 21. Der Rückschluß von der Impulsantwort auf den Brechzahlverlauf, inverses Streuproblem genannt, ist als inverses Reflexionsstreuproblem in G.M.L. Gladwell "Inverse problems in scattering: an introduction", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston London, 1993, Kapitel 5, S. 150f beschrieben. Diese Methode und jede andere, die dasselbe Ergebnis erreicht, wird hier als Lösung des eindimensionalen Streuproblems, insbesondere des eindimensionalen Reflexionsstreuproblems bezeichnet.

Zur Berechnung der Lösung des eindimensionalen Streuproblems, insbesondere des eindimensionalen Reflexionsstreuproblems bietet sich, wie in G.M.L. Gladwell "Inverse problems in scattering: an introduction", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston London, 1993 beschrieben, insbesondere eine ausreichend feine Diskretisierung der Impulsantwort und der dem Brechzahlverlauf entlang der Längsachse des Gitters entsprechenden longitudinalen Brechzahlverteilung an. Auch das optische Spektrum, insbesondere Reflexionsspektrum muß dazu in ausreichender Auflösung vorliegen. Statt der longitudinalen Brechzahlverteilung selbst, die ja beispielsweise im Falle eines optischen Gitters erster Ordnung pro optische Wellenlänge von einem Maximum zu einem Minimum und zurück geht, kann auch die Amplitude der entlang der Längsachse periodischen Brechzahlschwankung und ihre Ortsfrequenz, oder, als Integral der Ortsfrequenz über der Längsachse, die Phase der Brechzahlschwankung unter freier Wahl einer Anfangsphase dieser Brechzahlschwankung, jeweils als Funktion des Ortes auf der Längsachse angegeben werden. Im Fall eines abgetasteten Gitters, d. h. eines Gitters mit periodischer Überstruktur, bietet es sich insbesondere an, die Diskretisierung der Brechzahlverteilung entlang der Längsachse gemäß der Abtastungsperiode durchzuführen.

Durch Lösung des eindimensionalen Streuproblems, insbesondere eindimensionalen Reflexionsstreuproblems ergibt sich nun der Istverlauf 12 der periodisch schwankenden Brechzahl n des Gitters 10 im optischen Leiter 2, insbesondere durch Rückschluß aus dem Istverlauf 14 der Gitterstärke Δn und der Istverlauf 16 der Gitterkonstanten G .

Nun wird eine Differenz $d1$ zwischen dem berechneten Istverlauf 12 der Brechzahl n und deren Sollverlauf 11 und/oder eine Differenz $d2$ zwischen dem berechneten Istverlauf 14 der Gitterstärke Δn und deren Sollverlauf 13 und/oder eine Differenz $d3$ zwischen dem berechneten Istverlauf 16 der Brechzahl n und deren Sollverlauf 15 gebildet und danach durch Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels auf das Material des Leiters 2 die Differenz $d1$ und/oder die Differenz $d2$ und/oder die Differenz $d3$ zumindest zum Teil ausgeglichen.

In der Fig. 7 sind qualitativ Beispiele der jeweils vom Ort z abhängigen Differenzen $d1$, $d2$ und $d3$ über der Längsachse 21 dargestellt.

Nach diesem Ausgleich ist das Gitter 1 mit zumindest annähernd dem Sollverlauf 11 der Brechzahl n und/oder Sollverlauf 13 der Gitterstärke Δn und/oder Sollverlauf 15 der Gitterkonstanten G entstanden.

Das zum Ausgleich einer Differenz $d1$, $d2$ und/oder $d3$

verwendete brechzahlverändernde Mittel kann eine Belichtung des erzeugten Gitters 10 mit einer Strahlung S sein. Die Strahlung S kann optisch, beispielsweise UV-Licht sein oder auch aus einem Materiestrahl, beispielsweise Elektronen- oder Ionenstrahl bestehen. Bei Verwendung von Strahlung S ermöglichen geeignete Kombinationen der weiter oben angegebenen Belichtungsverfahren die unabhängige Beeinflussung der Gitterstärke und der mittleren Brechzahl des Gitters.

Das brechzahlverändernde Mittel zum Differenzausgleich kann auch eine chemische Behandlung C oder thermische Behandlung T des erzeugten Gitters 10 sein oder in einer zeitweiligen oder dauerhaften Erzeugung einer mechanischen Druck-, Zug- oder Scherspannung P am oder im Gitter 10 bestehen. Bei thermischer Behandlung T kann ein periodisches oder nichtperiodisches variables Temperaturprofil auf das Gitter 10 einwirken.

Das Maß an erreichter Verbesserung des Gitters 10 kann gesteigert werden, indem jeder einzelne der oben näher beschrieben erfindungsgemäßen Verfahrensschritt mindestens einmal wiederholt wird, insbesondere, indem alle Verfahrensschritte zyklisch wiederholt werden.

Eine Schwierigkeit besteht darin, daß die Belichtung, gleichgültig ob Wechsel- oder Gleichbelichtung, nur erhöht, nicht aber erniedrigt werden kann. Ein Ausgleich von Differenzen ist so nur in einer Richtung möglich. Das Problem läßt sich auf zwei Arten umgehen:

(i) Zumindest die erste, u. U. auch weitere Messungen der Gittereigenschaften werden schon vor dem Erreichen der an sich notwendigen Nominalbelichtung vorgenommen. Damit ist es möglich, lediglich mit Belichtungserhöhungen auszukommen.

(ii) Genaugenommen ist nicht die Belichtung, sondern die Brechzahlerhöhung maßgeblich. Wegen der allgemein vermuteten Instabilität von Faser-Bragg-Gittern gegenüber hohen Temperaturen könnte eine allgemeine oder lokal applizierte Erwärmung des Leiters die Brechzahlerhöhung zumindest teilweise rückgängig machen.

Es kann vorteilhaft sein, das komplexe Reflexionsspektrum nicht nur auf einer Seite des Gitters 10, sondern auch auf der anderen Seite des Gitters 10 zu messen. Auch die weiteren Berechnungsschritte werden dann für die beiden Fälle durchgeführt. Etwaige Unterschiede zwischen den zwei Lösungen des eindimensionalen Reflexionsstreuproblems können zur Erhöhung der Meßgenauigkeit durch Mittelung oder zur gleichzeitigen Berechnung der lokalen Gitterdämpfung herangezogen werden. Letztere wiederum erlaubt eine Korrektur der ursprünglich, unter der Annahme eines dämpfungsfreien optischen Leiters 2 gewünschten Sollverlaufs der Brechzahl n . Beispielsweise muß bei Anwendung eines Gitters 10 im Reflexionsbetrieb im Falle vorliegender Gitterdämpfung die Gitterstärke im hinteren Teil des Gitters 10 erhöht werden.

Es kann auch vorteilhaft sein, das komplexe Transmissionspektrum des Gitters 10 zu messen und weiterzuverarbeiten.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines optischen Gitters (1) in einem optischen Leiter (2), das
 - sich längs einer vorbestimmten Längsachse

- (21) des Leiters (2) erstreckt und
 – entlang dieser Längsachse (21) zumindest angenähert einen periodisch schwankenden Sollverlauf (11) einer Brechzahl (n) und/oder einen Sollverlauf (13) einer Gitterstärke (Δn) und/oder einen Sollverlauf (15) Gitterkonstanten (G) aufweist,
 – der jeweils durch Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T) auf das Material des Leiters (2) erzeugt wird, dadurch gekennzeichnet, daß
 a) im Leiter (2) durch Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T) auf das Material des Leiters (2) ein optisches Gitter (10) erzeugt, das
 a1) entlang der Längsachse (21) einen gewissen, periodisch schwankenden Istverlauf (12) der Brechzahl (n) aufweist, dem ein gewisser Istverlauf (14) der Gitterstärke (Δn) und ein gewisser Istverlauf (16) der Gitterkonstanten (G) entspricht,
 b) durch dieses erzeugte Gitter (10) zumindest ein optisches Signal (oS) entlang der Längsachse (21) geschickt und mit diesem Signal (oS) b1) zumindest näherungsweise ein bestimmtes komplexes optisches Spektrum (cSp) des erzeugten Gitters (10) gemessen,
 c) aus dem gemessenen komplexen Spektrum (cSp) mittels einer inversen Fouriertransformation eine Impulsantwort (Ir) des erzeugten Gitters (10) wenigstens näherungsweise berechnet,
 d) aus der berechneten Impulsantwort (Ir) durch eine Lösung eines bestimmten eindimensionalen Streuproblems der gewisse Istverlauf (12, 14, 16) der Brechzahl (n) und/oder der Gitterstärke (Δn) und/oder der Gitterkonstanten (G) des erzeugten Gitters (10) entlang der Längsrichtung (21) zumindest näherungsweise berechnet,
 e) eine Differenz (d1) zwischen dem berechneten Istverlauf (12) der Brechzahl (n) und deren Sollverlauf (11) und/oder eine Differenz (d2) zwischen dem berechneten Istverlauf (14) der Gitterstärke (Δn) und deren Sollverlauf (13) und/oder eine Differenz (d3) zwischen dem berechneten Istverlauf (16) der Gitterkonstanten (G) und deren Sollverlauf (15) gebildet, und
 f) durch Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T) auf das Material des Leiters (2) die Differenz (d1) zwischen dem berechneten Istverlauf (12) der Brechzahl (n) und deren Sollverlauf (11) und/oder die Differenz (d2) zwischen dem berechneten Istverlauf (14) der Gitterstärke (Δn) und deren Sollverlauf (13) und/oder die Differenz (d3) zwischen dem berechneten Istverlauf (16) der Gitterkonstanten (G) und deren Sollverlauf (15) zumindest zum Teil ausgeglichen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als optisches Signal (oS) ein unmoduliertes Signal verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein optisches Signal (oS) variabler optischer Frequenz (oF) verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als komplexes Spektrum (cSp) ein Reflexionsspektrum des erzeugten Gitters (10) gemessen, aus dem gemessenen Reflexionsspektrum (cSp) mittels einer inversen Fouriertransformation eine Impulsantwort (Ir) des erzeugten Gitters (10) im Reflexionsbetrieb wenigstens näherungsweise berechnet und aus dieser berechneten Impulsantwort (Ir) durch eine Lösung eines bestimmten eindimensionalen Reflexionsstreuproblems der Istverlauf (12, 14, 16) der Brechzahl (n) und/oder der Gitterstärke (Δn) und/oder der Gitterkonstanten (G) des erzeugten Gitters (10) entlang der Längsrichtung (21) zumindest näherungsweise berechnet werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als komplexes Spektrum (cSp) ein Transmissionsspektrum des erzeugten Gitters (10) gemessen, aus dem gemessenen Transmissionsspektrum (cSp) mittels einer inversen Fouriertransformation eine Impulsantwort (Ir) des erzeugten Gitters (10) im Transmissionsbetrieb wenigstens näherungsweise berechnet und aus dieser berechneten Impulsantwort (Ir) durch eine Lösung eines bestimmten eindimensionalen Transmissionsstreuproblems der Istverlauf (12, 14, 16) der Brechzahl (n) und/oder der Gitterstärke (Δn) und/oder der Gitterkonstanten (G) des erzeugten Gitters (10) entlang der Längsrichtung (21) zumindest näherungsweise berechnet werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T), das eine in der Längsrichtung (21) periodisch variierende Brechzahländerung im erzeugten Gitter (10) erzeugt.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T), das eine in der Längsrichtung (21) nichtperiodisch variierende Brechzahländerung im erzeugten Gitter (10) erzeugt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T), das eine in der Längsrichtung (21) konstante Brechzahländerung im erzeugten Gitter (10) erzeugt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel (S) in Form einer Belichtung des erzeugten Gitters (10) mit einer brechzahlverändernden Strahlung (S) verwendet wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß als brechzahlverändernde Strahlung (S) eine optische Strahlung bestimmter Wellenlänge verwendet wird.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß als brechzahlverändernde Strahlung (S) ein Materiestrahl verwendet wird.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel in Form einer thermischen Behandlung (T) des erzeugten Gitters (10) verwendet wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel in Form einer chemischen Behandlung (C) des erzeugten Gitters (10) verwendet wird.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden An-

zeugten Gitters (10) gemessen, aus dem gemessenen Reflexionsspektrum (cSp) mittels einer inversen Fouriertransformation eine Impulsantwort (Ir) des erzeugten Gitters (10) im Reflexionsbetrieb wenigstens näherungsweise berechnet und aus dieser berechneten Impulsantwort (Ir) durch eine Lösung eines bestimmten eindimensionalen Reflexionsstreuproblems der Istverlauf (12, 14, 16) der Brechzahl (n) und/oder der Gitterstärke (Δn) und/oder der Gitterkonstanten (G) des erzeugten Gitters (10) entlang der Längsrichtung (21) zumindest näherungsweise berechnet werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als komplexes Spektrum (cSp) ein Transmissionsspektrum des erzeugten Gitters (10) gemessen, aus dem gemessenen Transmissionsspektrum (cSp) mittels einer inversen Fouriertransformation eine Impulsantwort (Ir) des erzeugten Gitters (10) im Transmissionsbetrieb wenigstens näherungsweise berechnet und aus dieser berechneten Impulsantwort (Ir) durch eine Lösung eines bestimmten eindimensionalen Transmissionsstreuproblems der Istverlauf (12, 14, 16) der Brechzahl (n) und/oder der Gitterstärke (Δn) und/oder der Gitterkonstanten (G) des erzeugten Gitters (10) entlang der Längsrichtung (21) zumindest näherungsweise berechnet werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T), das eine in der Längsrichtung (21) periodisch variierende Brechzahländerung im erzeugten Gitter (10) erzeugt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T), das eine in der Längsrichtung (21) nichtperiodisch variierende Brechzahländerung im erzeugten Gitter (10) erzeugt.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Einwirkenlassen eines brechzahlverändernden Mittels (S, C, P, T), das eine in der Längsrichtung (21) konstante Brechzahländerung im erzeugten Gitter (10) erzeugt.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel (S) in Form einer Belichtung des erzeugten Gitters (10) mit einer brechzahlverändernden Strahlung (S) verwendet wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß als brechzahlverändernde Strahlung (S) eine optische Strahlung bestimmter Wellenlänge verwendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß als brechzahlverändernde Strahlung (S) ein Materiestrahl verwendet wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel in Form einer thermischen Behandlung (T) des erzeugten Gitters (10) verwendet wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel in Form einer chemischen Behandlung (C) des erzeugten Gitters (10) verwendet wird.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden An-

sprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einwirkenlassen ein brechzahlveränderndes Mittel in Form einer auf das erzeugte Gitter (10) ausgeübten mechanischen Spannung (P) verwendet wird.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein optischer Leiter (2) in Form eines optischen Wellenleiters verwendet wird. 5

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß ein optischer Wellenleiter (2) in Form einer optischen Faser verwendet wird. 10

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Messung eines komplexen Spektrums (cSp) des erzeugten Gitters (10) ein optisches Interferometer (40; 50) verwendet wird. 15

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest einer der Verfahrensschritte a) bis f) öfter als einmal durchgeführt wird. 20

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein komplexes Spektrum (cSp) sowohl an einem (10₁) als auch am anderen Ende (10₂) des erzeugten Gitters (10) gemessen wird. 25

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

FIG 1

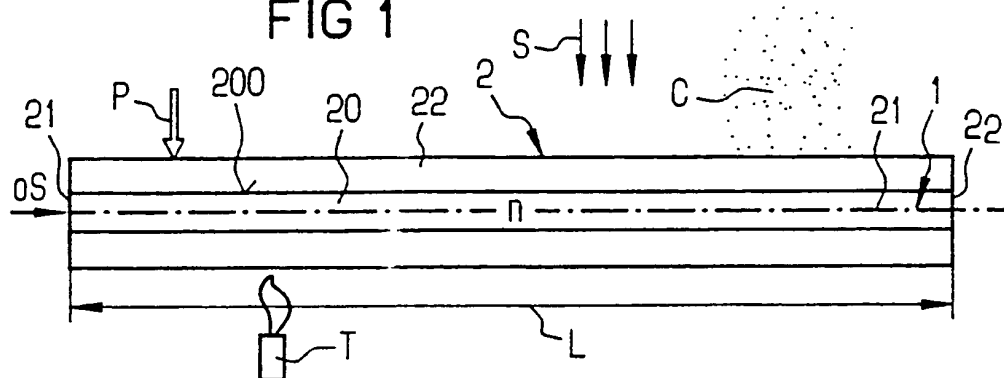


FIG 2

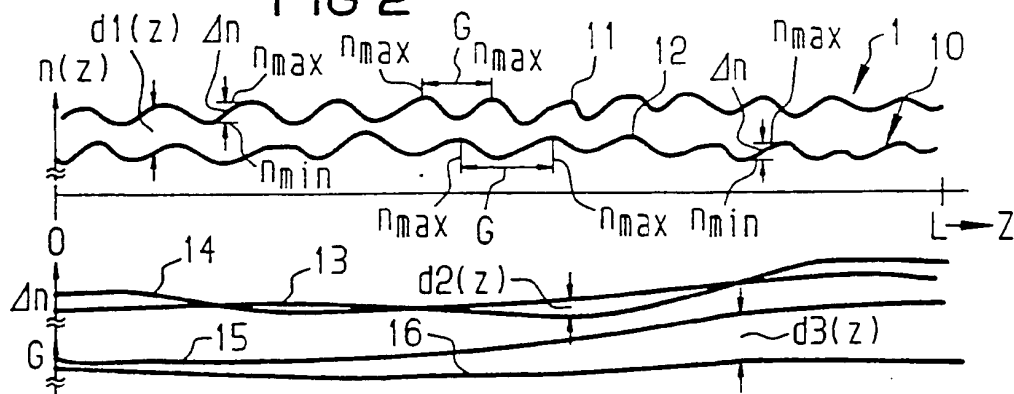
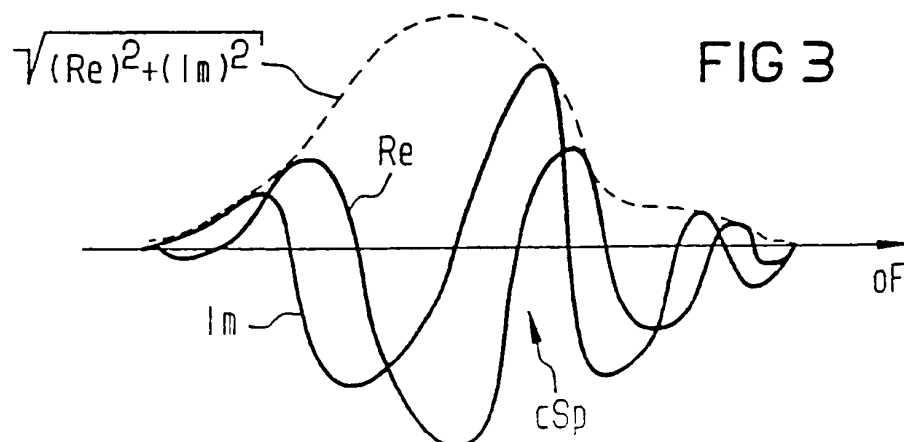
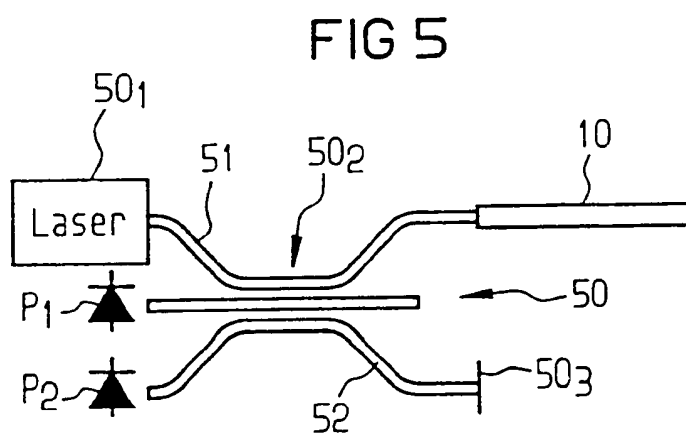
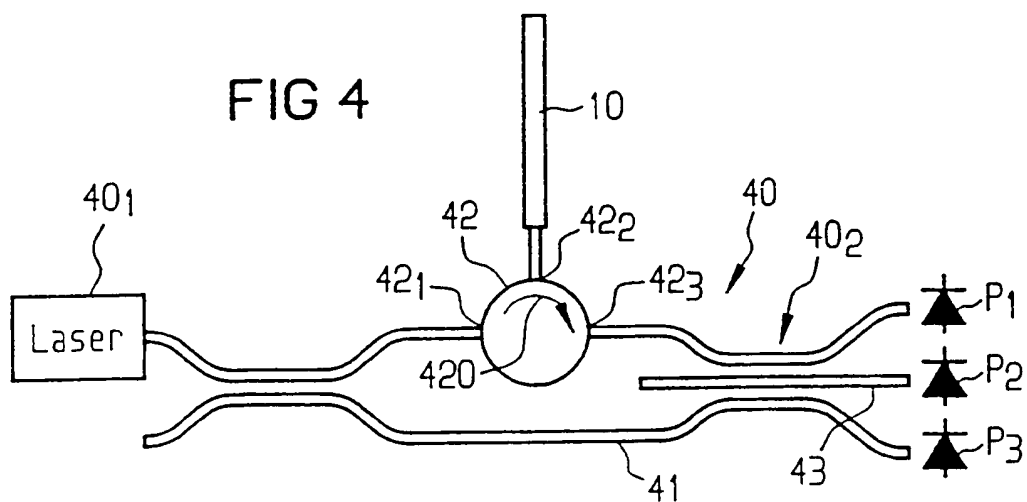


FIG 3





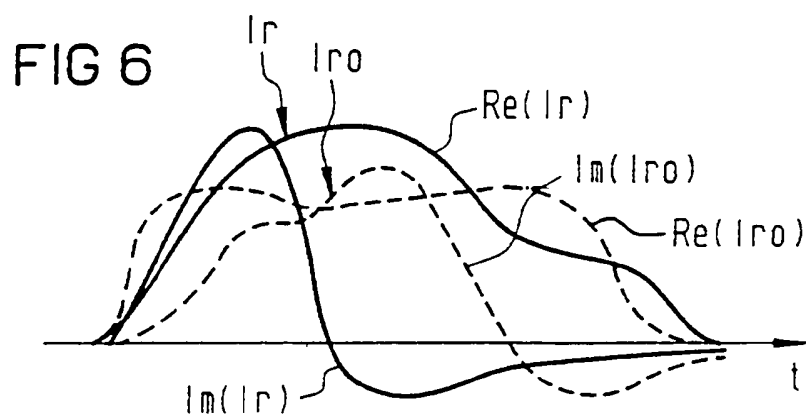


FIG 7

